

一种计算 DIP 芯片结温的热阻模型

毛章明¹ 罗小兵^{1,2} 刘菊¹ 刘胜²

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074;
2. 华中科技大学武汉光电国家实验室 MOEMS 研究部, 湖北 武汉 430074)

摘要 本文建立了一种计算塑料 DIP(双列直插式封装) 芯片结温的解析热阻模型, 该模型根据 DIP 封装结构的散热途径建立。模型中的每一热阻均能通过较为简单的解析式进行计算, 这与采用实验或数值模拟方法计算热阻的其他模型不同。利用该模型计算得到的一种塑料 DIP 芯片的结温与数值模拟得到的结温误差在 $\pm 10\%$ 以内。

关键词 DIP; 结温; 解析解; 热阻

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2011)02-0303-05

A THERMAL RESISTANCES MODEL FOR DIP'S JUNCTION TEMPERATURE CALCULATION

MAO Zhang-Ming¹ LUO Xiao-Bing^{1,2} LIU JU¹ LIU Sheng²

(1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;
2. Wuhan National Lab for Optoelectronics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract A thermal resistance model for junction temperature calculation of a plastic dual in-line packaging (DIP) was presented. The model was established based on the heat transfer paths in the DIP. Every thermal resistance can be calculated by simple analytical expressions, which is different with other models by experiments or numerical simulations. Comparing the junction temperatures calculated by the model and the results obtained by simulations, it is found that the relative errors between the two methods are in the range of $\pm 10\%$.

Key words DIP; junction temperature; analytical solution; thermal resistance

0 引言

DIP 是半导体工业中一种较为常用的电子封装形式。为了保证电子产品的可靠性和使用寿命, 电子产品在设计阶段需要进行热性能的分析。目前在半导体工业界被广泛使用的热性能分析的方法是实验法和数值模拟法。虽然这两种方法能得到较为精确的分析结果, 但是耗费的时间和资源较多且对工程人员的技术要求较高。因此, 找到一种通用、简便的热性能分析方法对提高电子产品的设计效率十分重要。热阻模型法是其中的一种。

鉴于热阻模型对热性能分析的优越性, 研究者对其进行了较为深入的研究。Bar-Cohen 等^[1] 在 1989 年首次提出了星形热阻网络模型。这种模型在等温条件下能精确预测结温。欧洲^[2,3] 在上世纪 90 年代实施了一项名为 DELPHI 的合作研究计划。在这个计划中 Lasance 等^[4] 建立了一种边界条件独

立的改进型星形简化热阻网络模型。在文献 [4] 提到的 38 种边界条件下, Lasance 等人提出的改进型星形热阻模型均能精确地预测结温, 相对误差仅为 1%~2%。Tal 等^[5] 提出了一种将 IC 封装热阻, 节点与环境之间热阻和节点与壳体之间的热阻, 转化为含有节点与封装体顶部间热阻和节点与母板间热阻的二热阻模型。

本文提出了一种计算塑料 DIP 芯片结温的热阻模型。该模型能较精确地预测塑料 DIP 芯片结温。

1 模型的建立

塑料 DIP 由以下几部分组成: 塑封的复合塑模材料, 芯片, 引线框及引脚。图 1 为塑料 DIP 焊接在 PCB 上的截面结构图, 其中引线框部分做了简化处理, 视为平板。稳态时芯片产生的热量传至环境

收稿日期: 2010-01-15; 修订日期: 2011-01-13

基金项目: 国家 973 项目 (No.2009CB320203)

作者简介: 毛章明 (1986-), 男, 江西安义人, 硕士研究生, 主要从事电子器件散热研究。

的途径有：(1) 热量从芯片导热至 DIP 上部复合塑模材料，通过对流换热传至环境；(2) 热量从芯片导热扩散到引线框，然后一部分传导至下层复合塑模材料并传至环境，一部分通过引脚导入 PCB，一部分在引脚处与环境对流换热散失。稳态时 DIP 的散热途径如图 2 所示。

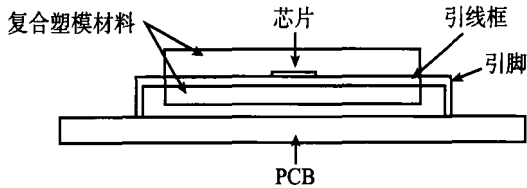


图 1 塑料 DIP 焊接在 PCB 上的截面结构
Fig. 1 Structure of a plastic DIP mounted on PCB

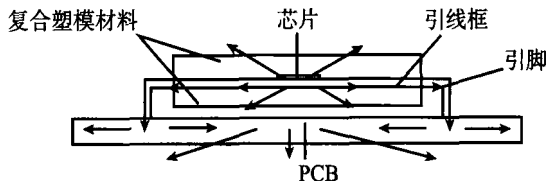


图 2 焊接在 PCB 上的 DIP 散热途径
Fig. 2 Thermal dissipation paths in DIP mounted on PCB

根据芯片与环境之间的散热途径，如图 1 所示的塑料 DIP 的热阻模型建立如图 3。

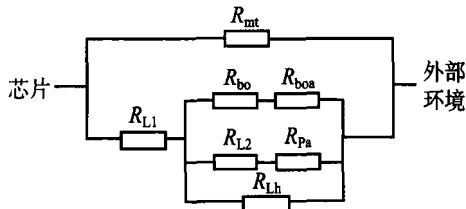


图 3 塑料 DIP 热阻网络模型
Fig. 3 Thermal resistance network for plastic DIP

图 3 中各热阻说明如下： R_{mt} 为上部复合塑模材料导热及其表面对流换热热阻之和； R_{L1} 是引线框热阻； R_{mbo} 是下层复合塑模材料热阻； R_{mboa} 为下层复合塑模材料底面的对流换热热阻； R_{L2} 为引脚热阻； R_{Pa} 为 PCB 导热和其表面对流换热热阻之和； R_{Lh} 为引脚表面对流换热热阻。热阻模型中的主要热阻的计算将在下文给出，较为简单的热阻计算仅列出表达式。

1.1 计算 R_{mt}

芯片位于复合塑模材料底部的中心且塑模材料的四周和顶部均为对流换热，所以文献 [6] 中得到的热源在中心，边界对流冷却的矩形热流通道的总热阻的解析式可用于计算 R_{mt} 。

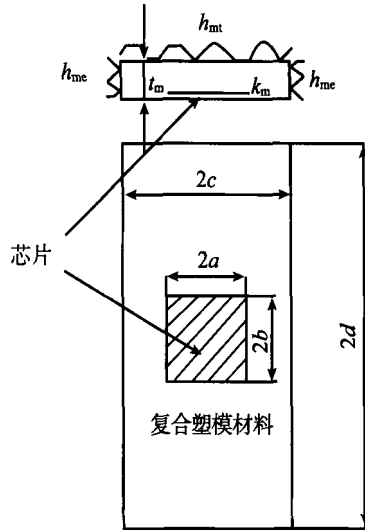


图 4 计算 R_{mt} 的尺寸和热参数
Fig. 4 Parameters for R_{mt} calculation

根据图 4 尺寸和热参数， R_{mt} 计算如下 [6]：

$$R_{mt} = \frac{cd}{k_m a^2 b^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2(\delta_{xm} a/c) \sin^2(\delta_{yn} b/d) \phi_{mn}}{\delta_{xm} \delta_{yn} \beta_{mn} [\sin(2\delta_{xm})/2 + \delta_{xm}] [\sin(2\delta_{yn})/2 + \delta_{yn}]} \quad (1)$$

其中， δ_{xm} , δ_{yn} , β_{mn} , ϕ_{mn} 的计算可参考文献 [6]， h_{mt} 为 DIP 顶部对流换热系数， h_{mbo} 为复合塑模材料四周对流换热系数， k_m 是复合塑模材料导热系数。

1.2 计算 R_{mbo} , R_{mboh} , R_{L2} , R_{Lh}

$$R_{mbo} = \frac{t_{mbo}}{k_m \cdot 4cd} \quad (1)$$

$$R_{mboh} = \frac{1}{h_{mbo} \cdot 4cd} \quad (2)$$

t_{mbo} 为下部复合塑模材料的厚度， h_{mbo} 为下部复合塑模材料底面对流换热系数。

$$R_{L2-1} = \frac{L}{k_L \cdot L_c L_d} \quad (3)$$

其中， $L = L_1 + L_2$ ， L_1 、 L_2 为单个引脚尺寸见图 5(a)； L_c 、 L_d 为单个引脚截面尺寸见图 5(c)； k_L 为引脚导热系数。多个引脚并行传热，所以引脚的总热阻为

$$R_{L2} = R_{L2-1}/n \quad (5)$$

n 是引脚数。

$$R_h = \frac{1}{h_s A_{LP}} \quad (6)$$

h_s 是引脚四周的对流换热系数， A_{LP} 是换热总面积。

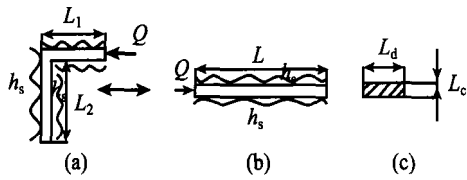


图 5 (a) 单个引脚实际换热结构 (b) “拉直”后换热结构 (c) 单个引脚截面

Fig. 5 (a) Actual heat transfer of a single lead (b) Heat transfer of a straightened lead (c) Lead section

1.3 计算 R_{Pa}

R_{Pa} 可视为一个多热源双面对流换热的平板的热阻。根据热阻的定义, R_{Pa} 为

$$R_a = \frac{\bar{T}_s - T_a}{Q} \quad (7)$$

\bar{T}_s 是多热源的平均温度, T_a 为环境温度。

如图 6 所示, 多热源双面换热的 PCB 被分为两个多热源单面换热的平板。这样处理的依据是 PCB 一般很薄, 其上表面热源所在区域的平均温度与其内部热源对应区域的平均温度相差很小, 所以可以认为热源位于 PCB 内部。热源产生的热量分别从热源所在层向 PCB 上下表面散热。因此, R_{Pa} 可以认为是两个多热源单面冷却平板热阻的并联。 R_t , R_b 分别为处理后 PCB 上下部分的热阻。

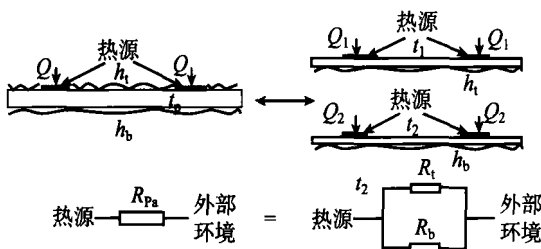


图 6 R_{Pa} 计算分析图

Fig. 6 Analysis chart for R_{Pa} calculation

PCB 拆分的两部分需要确定其厚度, t_1, t_2 。在 PCB 上下表面对流换热系数相等的情况下, 因为上下换热边界对称, 所以 $t_1 = t_2$ 。在 PCB 上下表面对流换热系数不等的情况下, 同样取 $t_1 = t_2$ 。但是, 此时上下表面的对流换热系数应取一个相同的等效对流换热系数。等效对流换热系数取为

$$h_{equ} = \frac{h_t A_t + h_b A_b}{A_t + A_b} \quad (8)$$

A_t, A_b 为上下表面对流换热面积。

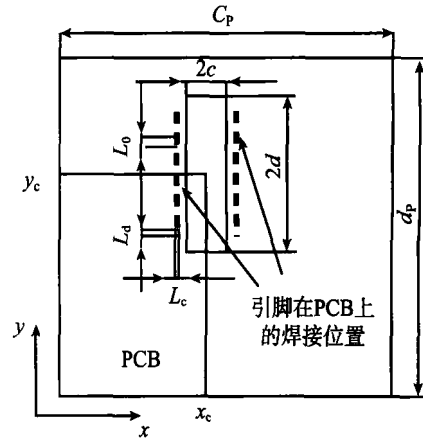


图 7 DIP 焊接在 PCB 上的位置及各器件尺寸
Fig. 7 Location of DIP mounted on PCB and device dimensions

得到拆分后平板的厚度和等效对流换热系数后可采用文献 [7] 中的方法得到热源的平均温度。图 7 为 DIP 焊接在 PCB 上的结构图。 L_0 是引脚间间距, (x_c, y_c) 为 DIP 几何中心在 PCB 上表面投影坐标。图 7 中第 j 个引脚区域的平均过余温度为

$$\bar{\theta}_j = \sum_{i=1}^n \bar{\theta}_i \quad (9)$$

$\bar{\theta}_i$ 为 $\theta_i(x, y, 0)$ 在 A_j 区域积分得到的平均过余温度, 具体计算可参考文献 [7]。

所有引脚区的平均温度为

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{\theta}_j A_j}{\sum_{j=1}^n A_j} \quad (10)$$

得到了所有热源的平均温度, 根据式 (7), R_t 和 R_b 为

$$R_t = R_b = \frac{\bar{\theta}}{Q} \quad (11)$$

Q 为所有引脚导入 PCB 的总热量, 计算中认为每一引脚导入 PCB 热量相等, 所以式 (9) 中 Q 会被消掉, 得到的热阻 R_t 和 R_b 为仅与 DIP, PCB 结构尺寸和热参数相关的表达式。

根据图 6 的计算分析, R_{Pa} 计算如下

$$R_a = \frac{R_t}{2} \quad (12)$$

1.4 计算 R_{L1}

R_{L1} 是引线框扩散热阻和一维导热热阻之和。引线框边界条件与 Muzychka 等 [7] 得到扩散热阻计算式的边界条件不同, 需要将引线框的边界条件等效为文献 [7] 中计算表达式的边界条件。

等效的根据是等效的对流换热条件下的散热量等于图 3 热阻网络中通过 R_{L1} 的热流量。引线框两侧边界的平均温度近似等于引线框底面的平均温度，等效的对流换热系数 h_{equ-L1} 为

$$h_{equ-L1} = \left(\frac{1}{R_{mbo} + R_{mboa}} + \frac{1}{R_{L2} + R_{La}} + \frac{1}{R_{Lh}} \right) / 4cd \quad (13)$$

等效处理后，引线框的扩散热阻计算如下^[7](尺寸和热参数如图 8 所示):

$$R_{Ls} = \frac{1}{2a^2cdk_L} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin^2(a\delta_m)}{\delta_m^3} \cdot \varphi(\delta_m) + \frac{1}{2b^2cdk_L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2(b\lambda_n)}{\lambda_n^3} \cdot \varphi(\lambda_n) + \frac{1}{a^2b^2cdk_L} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2(a\delta_m)\sin^2(b\lambda_n)}{\delta_m^2\lambda_n^2\beta_{m,n}} \cdot \varphi(\beta_{m,n}) \quad (14)$$

其中, δ_m 、 λ_n 、 $\beta_{m,n}$ 、 $\varphi(\zeta)$ 的计算可参考文献 [7], k_L 是引线框导热系数。

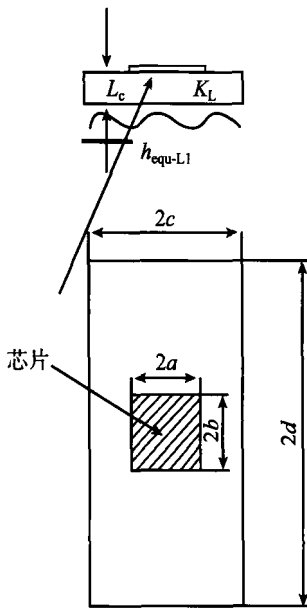


图 8 引线框结构尺寸和热参数

Fig. 8 Dimensions and thermal parameters of leadframe

R_{L1} 是 R_{L1s} 与其一维导热热阻之和, 计算如下:

$$R_{L1} = R_{L1s} + \frac{L_c}{k_L 4cd} \quad (15)$$

1.5 结温预测

图 3 所示热阻模型中热阻已全部求得, 总热阻 R_t 可计算求得。根据热阻定义, 芯片的结温计算如下

$$\bar{T}_d = R_t Q_D + T_a \quad (16)$$

其中, Q_D 为 DIP 的输入功率。

2 分析与讨论

本文采用所建热阻模型计算了一种 16 引脚塑料 DIP 在两组常见热条件下的芯片结温。同时, 采用 COMSOL 对相同尺寸和热条件下的该 DIP 进行了数值模拟并得到了芯片的结温。DIP 的尺寸见表 1。

表 1 选用塑料 DIP 尺寸

Table 1 Dimensions of the plastic DIP

DIP 结构	符号	尺寸
长度/mm	2d	19.035
宽度 (mm)	2c	6.35
上层复合塑模材料厚度/mm	t_m	1.65
上层复合塑模材料厚度/mm	t_{mbo}	1.65
芯片尺寸/mm	2a	4
	2b	4
引线框厚度/mm	L_c	0.25
	L_1	0.45
	L_2	1.95
引脚参数/mm	L_d	0.49
	L_0	1.625

PCB 的尺寸为 100 mm×100 mm×1 mm, DIP 放置在 PCB 中心且与 PCB 边平行。环境温度为 20°C, DIP 输入功率为 0.8 W。计算所采用的 DIP 和 PCB 的导热系数根据实际应用情况选取: 复合塑模材料, 0.3 W/(m·K); PCB, 5 W/(m·K); 芯片, 147 W/(m·K)。引脚和引线框的导热系数和所有表面的对流换热系数分别做为两组热条件的变化量。第一组热条件是: 引脚和引线框导热系数变化范围为 100~400 W/(m·K), 步长为 50 W/(m·K), 所有表面的对流换热系数为 5 W/(m²·K)。第二组热条件是: 引脚和引线框导热系数为 200 W/(m·K), 所有表面对流换热系数相同且在 1~10 W/(m²·K) 内变化, 步长为 1 W/(m²·K)。本文采用 MATLAB 根据热阻

表 2 第一组热条件下结果

Table 2 Results obtained under thermal conditions group I

$k_L/W/(m \cdot K)$	\bar{T}_m/K	\bar{T}_{simu}/K	$\bar{\theta}_m /K$	$\bar{\theta}_{simu}/K$	e/%
50	358.370	360.874	65.220	67.724	-3.70
100	345.055	348.294	51.905	55.144	-5.87
150	340.508	343.824	47.358	50.674	-6.54
200	338.210	341.509	45.060	48.359	-6.82
250	336.824	340.087	43.674	46.937	-6.95
300	335.895	339.123	42.745	45.973	-7.02
350	335.23	338.425	42.080	45.275	-7.06
400	334.731	337.896	41.581	44.746	-7.07

表 3 第二组热条件下结果

Table 3 Results obtained under thermal conditions group II

$h_t, h_b/W/(m^2 \cdot K)$	\bar{T}_m/K	\bar{T}_{simu}/K	$\bar{\theta}_m/K$	$\bar{\theta}_{simu}/K$	$e/\%$
1	376.488	380.879	83.338	87.729	-5.01
2	354.687	359.028	61.537	65.878	-6.59
3	346.351	350.345	53.201	57.195	-6.98
4	341.533	345.165	48.383	52.015	-6.98
5	338.210	341.509	45.060	48.359	-6.82
6	335.693	338.691	42.543	45.541	-6.58
7	333.672	336.403	40.522	43.253	-6.31
8	331.988	334.480	38.838	41.330	-6.03
9	330.548	332.826	37.398	39.676	-5.74
10	329.292	331.378	36.142	38.228	-5.46

模型编程计算芯片结温。式 (1) 取 100 项计算, 式 (10)、(14) 中单层累加项数为 100, 双层累加项取为 10000 项。

计算结果列于表 2, 表 3, \bar{T}_m , \bar{T}_{simu} 分别是热阻模型和数值模拟计算得到的芯片结温。误差定义是

$$e = \frac{\bar{\theta}_m - \bar{\theta}_{simu}}{\bar{\theta}_{simu}} \times 100\% \quad (17)$$

$\bar{\theta}_m$, $\bar{\theta}_{simu}$ 分别是热阻模型和模拟得到的芯片平均过余温度。

3 结 论

本文建立的热阻模型计算了两组热条件下一种塑料 DIP 芯片的结温。模型计算得到的芯片结温与相同条件下数值模拟计算结果接近, 两者相对误差小于 $\pm 10\%$ 。所以, 本文所建热阻模型能较精确计算

塑料 DIP 芯片结温。因为模型中每一热阻能计算得到, 该模型能提供一种找到影响芯片温度的主要因素的方法, 对热优化设计提供指导。

参 考 文 献

- [1] Bar-Cohen A, Elperin T and Eliasi R. θ_{jc} Characterization of Chip Packages-Justification, Limitations, and Future [J]. IEEE Trans., CHMT, 1989, 12(4): 724-731
- [2] Rosten H I, Lasance C J M, Parry J D. The World of Thermal Characterization according to DELPHI-Part I: Background to DELPHI [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A, 1997, 20(4): 384-391
- [3] Lasance C J M, Parry J D, Rosten H I. The World of Thermal Characterization According to DELPHI-Part II: Experimental and Numerical Methods [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A, 1997, 20(4): 392-398
- [4] Lasance C J M, Vinke H, Rosten H, et al. A Novel Approach for the Thermal Characterization of Electronic Parts [C]//11th IEEE Proc SEMI-THERM Conf. San Jose, CA, USA. 1995
- [5] Tal Y, Nabi A. A Simple Analytic Method for Converting Standardized IC-Package Thermal Resistances (θ_{ja} , θ_{jc}), into a Two-Resistor model (θ_{jb} , θ_{jt}) [C]//17th IEEE SEMI-THERM Symposium, San Jose, CA, USA. 2001: 134-144
- [6] Muzychka Y S, Culham J R, Yovanovich M M. Thermal Spreading Resistances in Rectangular Flux Channels Part II-Edge Cooling [C]//36th AIAA Thermophysics Conference. Orlando, Florida, AIAA 2003-4188
- [7] Muzychka Y S, Culham J R, Yovanovich M M. Thermal Spreading Resistance of Eccentric Heat Sources on Rectangular Flux Channels [J]. Transactions of the ASME, 2003, 125(22): 178-185